

ОПРЕДЕЛЕНИЕ РЕЖИМНЫХ ПАРАМЕТРОВ ВИБРАЦИОННОГО РЕЗАНИЯ С УЧЕТОМ КИНЕТИКИ МЕХАНОХИМИЧЕСКИХ ЯВЛЕНИЙ В УСЛОВИЯХ КОНТАКТНОЙ ЗОНЫ ПРИ ТОЧЕНИИ

The procedure of definition of a latent period of evolution APE is developed at vibrating cutting. Frequencies of forced oscillations of a cutter at which are carried out criteria requirements for display APE is defined.

Применение высокопрочных труднообрабатываемых материалов для изготовления ответственных деталей ГТД и других энергомашин создает необходимость усовершенствования или разработки новых режущих инструментов и технологических процессов резания. Традиционно, исследователи и разработчики процессов резания идут по пути:

а) создания и применения новых, сверх высокопрочных режущих инструментальных материалов (алмазных, керамических и др.), механическая обработка которых еще более сложна;

б) разработки и применения специальных покрытий или методов упрочнения режущих материалов;

в) создания специальных СОТС, методов их активации и подачи в рабочую зону;

г) усовершенствования или создания новых более прогрессивных технологий резания с применением различного рода дополнительных воздействий, таких, например, как вибрационное, электрохимическое, электроискровое, тепловое (и др.).

При этом при выборе метода дополнительного воздействия создатели руководствуются чаще всего "здравым смыслом" и интуицией, а не глубоким изучением.

Наибольшего развития получили работы посвященные разработке и применению новых сверхтвердых режущих материалов. Это и понятно, поскольку считается, что повышение эффективности резания высокопрочных сплавов требует применения режущих материалов со значительно более высокими прочностными свойствами, нежели обрабатываемые материалы.

В работах [1,2] проведен анализ процессов и явлений, протекающих в контактной зоне при лезвийном резании, на основании которого сделан вывод о том, что при прочих равных условиях, уменьшения работы резания можно достигнуть за счет мероприятий, направленных на:

обеспечение в зоне резания условий для физических явлений, способствующих снижению прочностных свойств срезаемого материала;

организацию такой кинематики процесса резания, при которой максимально снижается вероятность возникновения сухого трения на передней и задней поверхностях режущего клина.

Одними из наиболее важных физических явлений, способствующих решению поставленной задачи, следует считать адсорбционно-пластифицирующий (АПЭ) [3], электронно-пластический (ЭПЭ) [4,5] и магнито-пластический эффекты (МПЭ) [6].

Механизм адсорбционного влияния поверхностно-активных веществ (ПАВ) технологической среды на физико-механические свойства деформируемого металла рассмотрен в работах [7,8]. Процесс развития АПЭ можно представить в виде цепочки следующих последовательно протекающих этапов [2]:

Первый этап сопровождается адсорбцией ПАВ среды на поверхности твердого тела, которое подвергается деформированию.

Второй этап - гетерогенная микропластификация, которая приводит к локальному увеличению плотности дислокаций в приповерхностной зоне и вызывает упрочнение приповерхностного слоя, что является уже *третьим этапом*, который условно заканчивается при достижении критической плотности искажений (прежде всего дислокаций). Дальнейшее деформирование металла в условиях адсорбционной среды приводит уже к зарождению микротрещин, развитие которых вызывает его квазихрупкое разрушение – *четвертый этап*. Причем, чем больше начальная "пластификация" материала, тем сильнее его последующее "охрупчивание".

В условиях процесса резания металлов скорость образования новой поверхности может быть соизмерима или превышать скорость адсорбционных процессов взаимодействия этих поверхностей с окружающей средой, поэтому степень проявления АПЭ во многом будет зависеть от соотношения скоростей механохимических реакций контактной зоны и образования ювенильной поверхности.

При традиционных методах лезвийного резания металлов (точение, фрезерование, сверление, протягивание, строгание) доступ среды непосредственно в контактную зону весьма затруднен, поэтому режущая поверхность инструмента постоянно взаимодействует с ювенильными участками вскрываемой поверхности обрабатываемого материала. Это приводит к адгезионному износу режущей поверхности инструмента и как следствие - ухудшению эффективности резания. Кроме того, могут не обеспечиваться условия для проявления АПЭ, поскольку скорость образования новой поверхности может превышать скорость адсорбционных процессов взаимодействия этих поверхностей с охлаждающей средой. Следовательно, степень проявления АПЭ во многом будет зависеть от соотношения скоростей механохимических реакций и образования ювенильной поверхности в контактной зоне.

Для повышения эффективности воздействия смазывающе-охлаждающей технологической среды (СОТС) на энергоёмкость процесса стружкообразования при резании металлов за счет АПЭ необходимо обеспечить определенные кинематические условия для его проявления, как это было сделано в работе [9] для процессов шлифования, где были предложены два критерия:

1. Промежуток времени ($\Delta\tau_p$) между последовательным съемом стружки с одного и того же участка обрабатываемой поверхности не должен быть меньшим, чем латентный период $\Delta\tau_x$ времени развития АПЭ, т.е.

$$Sr = Dt_p/Dt_x \geq 1. \quad (1)$$

2. Количество атомов (молекул) Ω_k среды, которая подводится в контактную зону к ювенильным участкам поверхности, должно быть достаточным для того, чтобы осуществилась полномасштабная адсорбция, и образовался адсорбционный слой с показателем $\theta = 1$. Аналитически этот критерий можно представить в виде

$$W_k/W_{ad} \geq P, \quad (2)$$

где Ω_{ad} – количество атомов (молекул) в адсорбционном слое, $P \gg 1$.

Суть этих критериев заключается в стремлении, во-первых, обеспечить условия для протекания полномасштабной адсорбции и проявления АПЭ, а во-вторых, максимально снизить вероятность трения режущей поверхности инструмента (в данном случае абразивных зерен) с ювенильными участками обрабатываемой поверхности. При лезвийном резании доступ СОТС в зону непосредственного контакта инструмента и детали весьма затруднен, поэтому полномасштабное проявление АПЭ при точении без применения специальных мероприятий, практически невозможно. Одним из таких мероприятий может быть организация кинематики в виде управляемо-прерывистого процесса. К таковым процессам относится вибрационное резание. Понятно, что частота вибраций при этом должна зависеть от латентного периода $\Delta\tau_x$ развития АПЭ в условиях зоны лезвийного резания. Ранее было установлено что латентный период развития АПЭ при шлифовании лежит в пределах $\Delta\tau_x \sim 10^{-3} \dots 10^{-2}$ с. Можно ожидать, что при лезвийном резании эти значения будут такими же или близкими к ним, тогда частота вибраций должна находиться в пределах $f = 1/\Delta\tau_x \leq 10^3 \dots 10^2$ Гц.

Однако это предположение требует проверки, для проведения которой необходимо разработать методику определения значение $\Delta\tau_x$ при лезвийном резании.

1. Разработка методики определения кинетики механохимических явлений в условиях контактной зоны при точении

Для описания механохимических реакций, протекающих в контактной зоне при точении, воспользуемся кинетической схемой Буягина [10] и введем следующие допущения [8]:

1) стружкообразование обрабатываемого металла сопровождается

возникновением ювенильных участков поверхности, которая состоит из площади $S_{ю}$ поверхности раздела обрабатываемый металл - среда и площади $S_{я}$ поверхности полости ядер дислокаций, генерируемых при развитии пластических деформаций;

2) зарождение дислокации начинается с поверхности раздела – "твердое тело – среда" и сопровождается образованием элементарной ступеньки новой поверхности и цилиндрической поверхности полости ядра дислокации с радиусом r_0 , определяемым, например, по формуле

$$r_0 = \frac{\mu b^2}{8\pi^2 \gamma (1-\nu)} + \frac{Q_a^2}{2\pi^2 \gamma \cdot \epsilon_0 \cdot a^2}, \quad (3)$$

где μ – модуль сдвига, Па; b – вектор Бюргерса, м; γ – удельная поверхностная энергия твердого тела, Дж/м²; ν – коэффициент Пуассона; Q_a – суммарный заряд дислокации, Кл; $\epsilon_0 = 8,854 \cdot 10^{-12}$ – электрическая постоянная, ф/м; a – период кристаллической решетки, м;

3) активные центры адсорбции локализованы на ювенильных участках поверхности;

4) скорость образования центров пропорциональна скорости образования площади $S_{ю}$ ювенильной поверхности раздела обрабатываемый металл - среда и скорости образования площади $S_{я}$ поверхности полых ядер дислокаций, при этом число центров на единице новой поверхности постоянно для данного твердого тела;

5) все центры энергетически равноценны, и процессы с их участием можно описать в рамках модели однородной поверхности;

6) элементарный акт адсорбции происходит при соударении молекулы газообразной среды с ювенильной поверхностью обрабатываемого металла, а число молекул, адсорбирующихся за единицу времени на единице поверхности, пропорционально числу соударений молекул среды с плоской поверхностью, которое согласно [11]:

$$n_{ad} = p / \sqrt{2\pi MkT}, \quad (4)$$

где p – давление газообразной среды, Па; M – масса молекулы, кг; T – температура, °С; $k = 1,38045 \cdot 10^{-23}$ – Постоянная Больцмана, Дж/К;

7) атомы, адсорбирующиеся на цилиндрической поверхности полых ядер генерируемых дислокаций, увлекаются с поверхности раздела твердое тело - среда в момент генерации (в основном винтовых) дислокаций, поэтому площадь потока адсорбции равна площади $S_{ю}$ ювенильной поверхности раздела обрабатываемый металл - среда;

8) процесс самопроизвольной гибели центров, характеризующийся временем их жизни τ_0 , отождествляется с релаксацией избыточной энергии вскрываемой ювенильной поверхности;

9) активные короткоживущие центры в вакууме гибнут самопроизвольно, а

в химически активных средах их гибель сопровождается взаимодействием с адсорбирующимися молекулами или атомами.

Для составления уравнения изменения количества центров адсорбции при стружкообразовании металлов используем теорию диссоциативной адсорбции, согласно которой плотность потока J молекул имеет вид

$$J = \alpha_x p / \sqrt{2\pi M k T} - \xi \theta^2 \cdot \exp(-Q/kT), \quad (5)$$

где α_x - вероятность химической реакции при соударении; x - коэффициент пропорциональности; p - истинное (или текущее) значение степени покрытия поверхности адсорбирующимся веществом; Q - энергия активации процесса десорбции, Кал/моль.

Количество молекул среды $N_{ад}(t)$, поступающее в единицу времени к ювенильным участкам поверхности, образуемым при стружкообразовании обрабатываемого металла в единицу времени, будет

$$N_{ад}(\tau) = n_{ад} \cdot S_{ю} = \left[\alpha_x p / \sqrt{2\pi M k T} - \xi \theta^2 \cdot \exp(-Q/kT) \right] \cdot S_{ю} \quad (6)$$

Скорость образования центров адсорбции $N(\tau)$ при тчении обрабатываемого металла с периодом кристаллической решетки, равным a , определим из соотношения

$$N(\tau) = a^{-2} (S_{ю} + S_{я}) \quad (7)$$

Скорость самопроизвольной гибели центров адсорбции $N_{ан}(t)$ можно выразить в виде

$$N_{ан}(\tau) = \tau_0^{-1} (1 - \theta) \quad (8)$$

Будем считать, что процесс резания металла стационарный, т.е. величина скорости образования центров адсорбции постоянная. С учетом условий проявления АПЭ при тчении, интерес представляет интервал времени Dt_x , необходимый для образования адсорбционного моно слоя на ювенильной поверхности, которая равна площади поверхности трения режущего клина с деталью. Этот интервал Dt_x определится из соотношения

$$\Delta \tau_x = \frac{N(\tau) - N_{ан}(\tau)}{N_{ад}(\tau)} = \frac{a^{-2} \cdot (S_{ю} + S_{я}) - \tau_0^{-1} (1 - \theta)}{\left[\alpha_x p / \sqrt{2\pi M k T} - \xi \theta^2 \cdot \exp(-Q/kT) \right] \cdot S_{ю}} \quad (9)$$

С учетом зависимостей (6) - (8) и после соответствующих преобразований, уравнение (9) может быть представлено в следующем виде

$$\Delta \tau_x = \frac{\tau_0 (1 + S_{я}/S_{ю}) - a^2 / S_{ю} \cdot (1 - \theta)}{\left[\alpha_x p / \sqrt{2\pi M k T} - \xi \theta^2 \cdot \exp(-Q/kT) \right] \cdot a^2 \tau_0} \quad (10)$$

Для того чтобы можно было воспользоваться уравнением (10), необходимо выразить скорости образования поверхностей $S_{ю}$ и $S_{я}$ через значения режимных параметров.

В случае тчения часть передней и задней поверхности режущего клина инструмента находится в постоянном контакте с ювенильными участками вскрываемой при стружкообразовании обрабатываемой поверхности детали. Именно в эту зону непосредственного контакта доступ среды очень затруднен, а точнее практически невозможен. Вследствие чего материал инструмента подвергается адгезионному износу. Чтобы снизить или даже исключить вероятность адгезионного износа и обеспечить условия для проявления АПЭ процесс резания должен быть прерывистым, т.е. на режущий инструмент (или деталь) необходимо наложить колебательное движение с некоторой амплитудой A_0 и частотой $f \sim 1/Dt_x$. Здесь Dt_x - промежуток времени необходимый для образования адсорбционного слоя (и проявления АПЭ) в зоне непосредственного контакта режущего клина с обрабатываемой поверхностью.

Для того чтобы выразить скорости образования поверхностей $S_{ю}$ и $S_{я}$ в формуле (10) через значения режимных параметров, воспользуемся расчетной схемой, изображенной на рис. 1. Кроме того, введем ряд допущений и ограничений.

1. Будем считать, что режущий инструмент совершает поступательное перемещение со скоростью поперечной подачи S в плоскости XY вдоль оси X вращения обрабатываемой детали и колебательное движение вдоль оси Z по закону

$$z = A_0 \sin wt, \quad (11)$$

где A_0 - амплитуда колебаний, м; $w = 2\pi \nu$ - круговая частота колебаний, ν - частота колебаний, Гц.

2. При снятии стружки передняя поверхность режущего клина непосредственно контактирует с ювенильной поверхностью снимаемой стружки на площади

$$S_n = K_1 L_n b, \quad (12)$$

где L_n и b - длина и ширина зоны контакта. Кроме того, задняя поверхность режущего клина также контактирует с ювенильной поверхностью, вскрываемой на обрабатываемой детали на участке площадью

$$S_3 = K_2 L_3 b, \quad (13)$$

где L_3 - длина зоны контакта, K_1 и K_2 - коэффициенты, зависящие от геометрических параметров режущего клина, свойств обрабатываемого материала и режимов обработки.

3. В соответствии с [12] скорость резания V_d должна удовлетворять

условию

$$V_d \leq 2\pi \cdot A_0 \cdot f / 3 \quad (14)$$

С учетом этого промежуток времени Dt_n в течение, которого нет контакта между деталью и инструментом с учетом (11) - (14) определится из соотношения

$$\Delta\tau_n = 3/2\pi \cdot f \cdot \sin(2\pi f \cdot \Delta\tau_n + \pi/2) \quad (15)$$

4. Будем считать, что в течение промежутка времени Dt_n в "контактную" зону поступает технологическая среда, и происходят адсорбционные явления, которые приводят к образованию на обрабатываемой поверхности хемосорбционного слоя со степенью покрытия Q , значение которого (при прочих равных условиях) зависит от Dt_n и не превышает 1. Будем также считать, что на этапе резания образовавшийся хемосорбционный слой способствует проявлению АПЭ по уже описанному механизму.

Исходя из вышеизложенного промежуток времени Dt_p , в течение которого происходит элементарный акт стружкообразования, определится из соотношения

$$\Delta\tau_p = 1/f - \Delta\tau_n. \quad (16)$$

Площадь $S_{ю}$ ювенильной поверхности, вскрываемой при стружкообразовании, может быть определена из соотношения

$$S_{ю} = 2(b+a) \cdot V_p \cdot \Delta\tau, \quad (17)$$

где V_p – скорость резания, м/с; b и a – ширина и толщина стружки соответственно, м.

Ширину и толщину стружки (или среза) можно определить из соотношений

$$b = t / \sin\varphi, \quad (18)$$

$$a = S \cdot \cos\varphi, \quad (19)$$

где t – глубина резания, м; S – продольная подача, м/с; φ – передний угол; φ_1 – задний угол резания.

Тогда, с учетом (18) и (19) зависимость (17) примет следующий вид

$$S_{ю} = 2(t + S \cdot \operatorname{tg} j) \cdot V_p \cdot \Delta\tau / \sin j. \quad (20)$$

В связи с тем, что процесс виброрезания носит прерывистый характер, то процесс образования ювенильной поверхности будем рассматривать в течение промежутка времени Dt_p – время элементарного акта стружкообразования.

Для определения поверхности S_n полости ядер дислокаций, которые зарождаются при резании в контактной зоне, введем следующие упрощающие допущения.

1. В снимаемой стружке формируется равномерно распределенная по объему дислокационная структура с предельной плотностью дислокаций γ_m , шт.·м⁻²;

2. При снятии стружки в поверхностной зоне обрабатываемого материала формируется дислокационная структура с плотностью дислокаций, распределенной на глубину поверхностного слоя h по некоторому закону $\gamma(r)$ от максимального значения γ_m при $r=R$ до исходного γ_0 при $r=R-h$.

3. Средняя длина l дислокаций обратно пропорциональна корню квадратному из плотности дислокаций, т.е.

$$l = 1 / \sqrt{\rho(r)}. \quad (21)$$

С учетом этих предположений площадь поверхности полости ядер дислокаций S_n , генерируемых при стружкообразовании, может быть определена как сумма площади $(S_n)_{стр}$ поверхности в дислокациях, генерируемых в снимаемой стружке и площади $(S_n)_д$ поверхности в дислокациях, генерируемых в поверхностном слое, формирующемся под обрабатываемой поверхностью детали. Площадь поверхности полости ядер дислокаций $(S_n)_{стр}$, генерируемых в снимаемой стружке за промежуток времени Dt_p может быть определена из соотношения

$$(S_n)_{стр} = 2\pi \cdot r_0 \cdot S \cdot \operatorname{tg} j \cdot \left(t - \frac{S}{2 \cdot (1 + \operatorname{tg} j \cdot \operatorname{tg} j_1)} \right) V_p \cdot (\rho_m - \rho_0) \cdot \Delta\tau_p. \quad (22)$$

Площадь поверхности полости ядер дислокаций, генерируемых в формирующемся на детали поверхностном слое, определяется из выражения

$$(S_n)_д = 2\pi \cdot r_0 \cdot \Delta\psi \int_{R-h}^R \rho(x) x \cdot dx = 2\pi \cdot r_0 \cdot \left(\frac{2\pi \cdot A_0}{R} f + \omega_d \right) \cdot \Delta\tau_p \cdot \int_{R-h}^R \rho(x) \cdot \quad (23)$$

где $\Delta\psi = ((2\pi \cdot A_0 / R) f + \omega_d) \cdot \Delta\tau_p$ – угол поворота детали за время $\Delta\tau_p$ элементарного акта резания, R – радиус обрабатываемой поверхности, м.

В соответствии с [13] изменение плотности генерируемых при резании дислокаций по глубине поверхностного слоя обрабатываемого изделия может быть описано уравнением

$$\rho(r) = (\rho_m - \rho_0) \cdot \left(1 - \frac{x}{h} \right)^\chi + \rho_0. \quad (24)$$

После подстановки уравнения в уравнение (23), интегрирования и соответствующих преобразований получим

$$(S_{\text{я}})_{\text{д}} = 2\pi \cdot r_0 \cdot h \cdot \left(\frac{2\pi \cdot A_0}{R} f + \omega_{\text{д}} \right) \cdot \Delta\tau_p \cdot (\rho_m - \rho_0) \left[\frac{1}{\psi(\rho)} + \left(\frac{1}{\chi + 1} \right) \right] \quad (25)$$

где $\psi(\rho) = \Delta\rho/\rho_0 = (\rho_m - \rho_0)/\rho_0$ - степень изменения плотности дислокаций

Общая площадь поверхности полости ядер $S_{\text{я}}$, генерируемых в стружке и в поверхностном слое обрабатываемой детали, с учетом (20) и (23) и соответствующих преобразований, будет

$$S_{\text{я}} = 2\pi r_0 \cdot (\rho_m - \rho_0) \cdot \Delta\tau_p \left[S \cdot V_p \cdot tgj \cdot \left(t - \frac{S}{2(1 + tgj \cdot tgj_1)} \right) + \left(\frac{2\pi \cdot A_0}{R} f + \omega_{\text{д}} \right) \right] \quad (26)$$

Теперь, с учетом (20) - (26), уравнение (10) преобразуется к виду:

$$\Delta\tau_x = \frac{\tau_0 \left(1 + \frac{2\pi r_0 \cdot (\rho_m - \rho_0) \cdot \left[S \cdot V_p \cdot tgj \cdot \left(t - \frac{S}{2(1 + tgj \cdot tgj_1)} \right) + (2\pi f \cdot A_0/R + \omega_{\text{д}}) \cdot \left(\frac{1}{\psi(\rho)} + \left(\frac{1}{\chi + 1} \right) \right) \cdot h \right]}{2(t + S \cdot tgj) / \sin j \cdot V_p} \right)}{\left[\frac{a \cdot p}{\sqrt{2\pi M k T}} - \xi \theta^2 \cdot \exp\left(-\frac{Q}{kT}\right) \right] \cdot a^2 \tau_0} \quad (27)$$

Воспользовавшись уравнением (27) оценим возможные значения $\Delta\tau_x$ при круглом врезном шлифовании изделия из стали диаметром $d=0,06$ м при следующих (рекомендуемых [84, 85]) режимах шлифования. Скорость шлифования $V_k=35$ м/с; линейная скорость кругового вращения детали $V_d=0,65$ м/с; радиальная подача на врезание $S_n=2 \cdot 10^{-5}$ м/с; абразивный круг ПП 600х40х305 24А40НСМ15К1.

Поскольку с точки зрения шлифования нас больше всего интересует минимальное значение Dt_x , то пренебрежем десорбцией и рассмотрим вариант, когда $q>0$, а $a=1$. Будем считать, что в контактной зоне осуществляется охлаждение парами воды $M(H_2O)=2,99 \cdot 10^{-26}$ кг при давлении $p=101325$ Па. Средняя температура контактной зоны $T \gg 400$ К. Для расчета примем следующие значения параметров: радиус округления режущего выступа абразивного зерна $r=2 \cdot 10^{-5}$ м; средняя начальная плотность дислокаций $r_0=2,71 \cdot 10^{15}$ шт./м², а максимальная - $r_m=7,9 \cdot 10^{18}$ шт./м²; $c=1,45$; $a=1,0$; $t_0=10^{-3}$ с [111]. Длину дуги контакта определяем по формуле (1.10) $L_k \gg 1,24 \cdot 10^{-3}$ м. Плотность режущих зерен на рабочей поверхности абразивного круга можно определить по формуле (1.6) $n_p \gg 52847,1$ шт./м². Среднее расстояние между режущими абразивными зернами $l_p \gg n_p^{-1/2} = 4,35 \cdot 10^{-3}$ м. Энергия активации десорбции хемосорбированных молекул среды [99] $Q=570$ кДж/моль. Постоянная Больцмана $k=1,38045 \cdot 10^{-23}$ Дж/К. Радиус цилиндрической полости ядра дислокации выбираем равным (см. таблицу 2.1) $r_0 \gg 25 \cdot 10^{-10}$ м.

Проведенные по формуле (27) оценки показали, что $\Delta\tau_x \cong (0,9...2,1) \cdot 10^{-3}$ с. Таким образом, для обеспечения условий для проявления АПЭ при точении труднообрабатываемых материалов необходимо чтобы процесс был

прерывчатым с обеспечением условия $\Delta\tau_p \geq (0,9...2,1) \cdot 10^{-3}$ с. С учетом зависимостей (14) - (16) частоту вибраций f можем определить решив уравнение

$$f = \frac{2\pi - 3}{2\pi \cdot \Delta\tau_p} \cdot \cos(2\pi f \cdot \Delta\tau_p) \quad (28)$$

Оценки, проведенные по формуле (28) показали, что при изменении $\Delta\tau_p$ в вышеуказанном диапазоне ($0,9 \cdot 10^{-3}$ до $2,1 \cdot 10^{-3}$ с) частота накладываемых на резец колебаний, при которых выполняются критериальные условия для проявления АПЭ, должна лежать в диапазоне от 100 Гц до 2 кГц.

Выводы:

1. Получена формула для определения латентного периода Dt_x развития АПЭ в условиях вибрационного точения металлов с учетом режимных параметров резания и свойств обрабатываемого материала (распределение плотности дислокаций по глубине формируемого при резании поверхностного слоя).

2. Установлено, что диапазон частот принудительных колебаний, которые должны накладываться на резец при вибрационном резании и обеспечивать выполнение критериальных условий для проявления АПЭ лежит в диапазоне от 100 Гц до 2 кГц.

Список литературы: 1. Сурду Н.В. Физические основы повышения эффективности процессов лезвийной обработки труднообрабатываемых металлов и сплавов // Резание и инструмент в технологических системах: Международный научно-технический сборник. – Харьков: НТУ «ХПИ», 2007. – Вып.73. – С.296-305. 2. Сурду Н. В., Тарелин А. А., Романов В. В., Фистик А. Г. Пути повышения эффективности процессов резания труднообрабатываемых материалов // Восточно-европейский журнал передовых технологий. – Вып. №6/1 (30). – 2007. – с. 9-17. 3. Ребиндер П. А. Поверхностные явления в дисперсионных системах: Избр. тр. // Физико-химическая механика. – М.: Наука, 1979. – 381 с. 4. Спицин В.И., Троицкий О.А. Электропластическая деформация металлов. – М.: Наука. – 1985. – 160 с. 5. Зуев Л.Б. Электрические поля и пластичность кристаллов. // Соросовский образовательный журнал. – №9, 1998. – С. 92-95. 6. Головин Ю.М.. Магнитопластичность твердых тел (Обзор) // ФТТ. – 2004. – Т. 46. – Вып. 5. – С.769-803. 7. Сурду Н.В. Микромеханизм влияния сред на пластическое деформирование и разрушение металлов. Часть 1. О наличии полости вдоль оси дислокации // Вопросы проектирования и производства летательных аппаратов. – Харьков: НАКУ "ХАИ", 2000. – Вып. 23 (6). – С.116-123. 8. Сурду Н. В. Микромеханизм влияния сред на пластическое деформирование и разрушение металлов. Часть 2. Модель микромеханизма // Вопросы проектирования и производства летательных аппаратов. – Харьков: НАКУ "ХАИ", 2001. – Вып. 24 (1). – С.139-147. 9. Сурду Н.В. Адсорбционное влияние сред при шлифовании металлов // Пробл. Машиностроения. – 1999. – Т2. – №1-2. – с.106-113. 10. Бутягин П.Ю. Разупрочнение структуры и механохимические реакции в твердых телах АН СССР // Усп. химии. – 1984. – ЛП, вып. 11. – С.1769-1790. 11. Чеботин В.Н. Физическая химия твердого тела. – М.: Химия, 1982. – 320 с., ил. 12. Кумабэ Д. Вибрационное резание. Перевод с яп. С.Л. Масленникова / Под ред. И.И. Порт нова, В.В. Белова. – Машиностроение, 1985. – 424 с. 13. Якубов Ф.Я. Энергетические соотношения процесса механической обработки материалов. – Ташкент: "Фан", 1985. – 104 с.

Поступила в редколлегию 15.05.2008